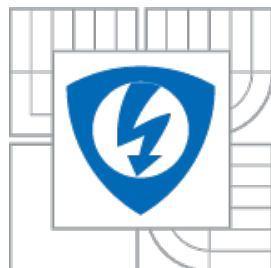




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ANALÝZA A OPTIMALIZACE SELEKTIVNÍCH TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ PRO KONTAKTY KRYSTALICKÝCH KŘEMÍKOVÝCH SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

THE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF SELECTIVE TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR
CONTACTS ON CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS

DIZERTAČNÍ PRÁCE – ZKRÁCENÁ VERZE
DOCTORAL THESIS – SHORT VERSION

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JIŘÍ HLADÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. IVAN SZENDIUCH, CSC.

BRNO 2013

Klíčová slova:

selektivní procesy, fotovoltaický článek, přední metalizace, laserové procesy, chemický nikl, analýza kontaktů, vodivé lepidlo, měděný drátek.

Key words:

selective processes, solar cell, front side metallization, laser processes, electro-less nickel, analysis of contacts, conductive adhesive, copper wire.

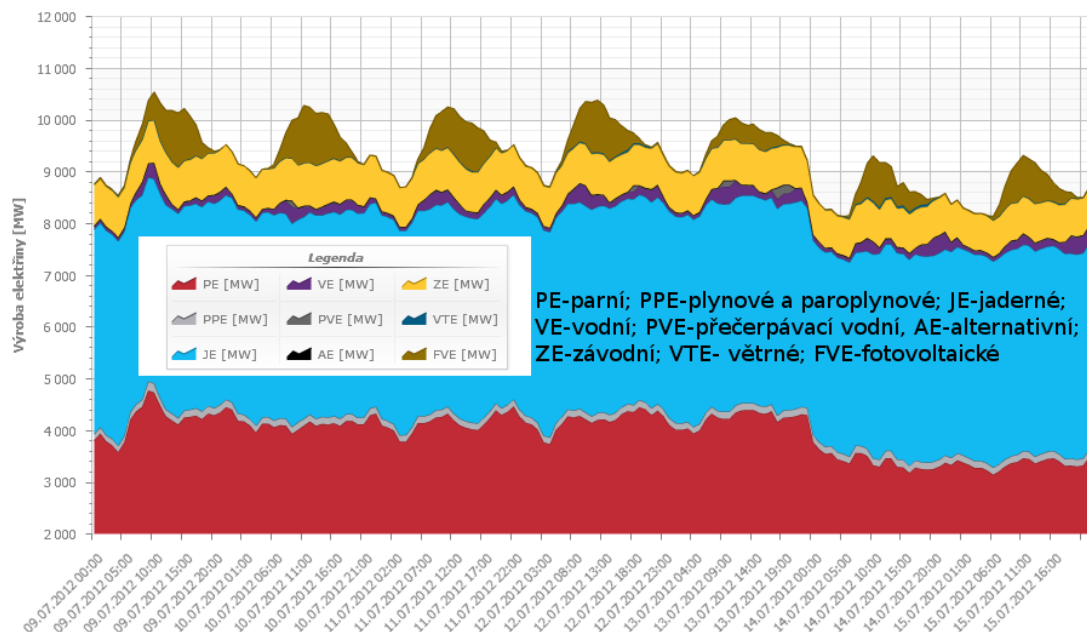
Obsah

1 Úvod.....	5
2 Specifikace cílů dizertace.....	6
3 Současný stav a vymezení oblasti disertace.....	7
3.1 Laserové procesy při výrobě krystalických solárních článků.....	7
3.2 Selektivní depozice kovových vrstev.....	8
3.3 Analýza vlastností kovových vrstev.....	9
3.4 Důsledky parazitních odporů.....	10
4 Výsledky disertace.....	12
4.1 Selektivní metalizace přední strany FV článků.....	12
4.2 Návrh a optimalizace nového typu zesílení Ni kontaktů.....	20
5 Závěr a zhodnocení.....	28

1 Úvod

V současné době jsou v ČR instalovány fotovoltaické elektrárny o souhrnném výkonu převyšující 2 GW_p. To odpovídá elektrickému výkonu dvou reaktorů jaderné elektrárny Temelín. Samozřejmě je to výkon, díky své podstatě mnohem nestálější, nicméně v lidských měřítkách mnohem ekologičtější a v blízkém horizontu i levnější, protože dodavatelem primární energie je nevyčerpatelný zdroj – Slunce. V této souvislosti je třeba si uvědomit, že fotovoltaika v sobě skrývá velký potenciál (i pro oblast ČR) v podobě instalací fotovoltaických panelů na střechy nebo fasády rodinných domů, průmyslových nebo administrativních objektů. V současné době již existují FV systémy pro částečné pokrytí vlastní spotřeby těchto objektů. Pokud budou náklady na fosilní zdroje stoupat a zároveň klesat cena komponent fotovoltaických systémů, je velká pravděpodobnost, že se fotovoltaika rozšíří ze střech a polí FV instalací i na mnohé další objekty.

Jednou z výhod rozumné velikosti a rozmístění FV elektráren po ČR je časová shoda výroby s odběrovým diagramem elektrické energie. Při vhodné krátkodobé předpovědi výroby elektrické energie ze všech obnovitelných zdrojů lze využít fotovoltaické elektrárny (i malého rozsahu) pro pokrytí špiček v odběrovém diagramu (Obr. 1.1).



Obr. 1.1: *Hodinové průměry podílu výroby jednotlivých zdrojů v elektrizační soustavě ČR v 28. týdnu (9.7.-15.7.2012). [11]*

V oblasti krystalických křemíkových článků probíhá rozsáhlý výzkum na mnoha pracovištích, protože neustále existuje prostor pro zvýšení konverzní účinnosti, snížení materiálových a energetických požadavků na výrobu FV článků a potažmo jejich ceny. Jednou z mnoha oblastí pro inovace je metalizace emitoru na přední-osvětlené straně fotovoltaických článků. Průmyslovým standardem pro výrobu kontaktů n - typových emitorů se stala tlustovrstvá technologie tisku stříbrných past. Díky neustálé zvyšující se ceně stříbra jsou, zvláště v poslední době, hledány alternativy k tomuto typu metalizace. Slibných výsledků je dosahováno při náhradě stříbra mědi.

2 Specifikace cílů dizertace

Hlavním cílem dizertace je výzkum, analýza, návrh a ověření realizace nového typu předního kontaktu křemíkových solárních článků.

Dílčí cíle řešené v průběhu disertační práce lze přehledně shrnout do následujících bodů:

- Analýza a zhodnocení selektivních procesů efektivně využitelných při výrobě předních kontaktů křemíkových solárních článků,
- výzkum výroby kontaktů na strukturách solárních článků se zaměřením na analýzu jejich elektrických vlastností při různých depozičních podmínkách,
- analýza využití chemické depozice Ni jako zárodečné vrstvy kontaktu fotovoltaiického článku,
- na základě výsledků z předchozích bodů navrhnout a ověřit novou, technologicky proveditelnou výrobu předního kontaktu krystalického solárního článku,
- ověření elektrických a mechanických vlastností nového typu kontaktů na funkčních vzorcích solárních článků.

3 Současný stav a vymezení oblasti disertace

3.1 Laserové procesy při výrobě krystalických solárních článků

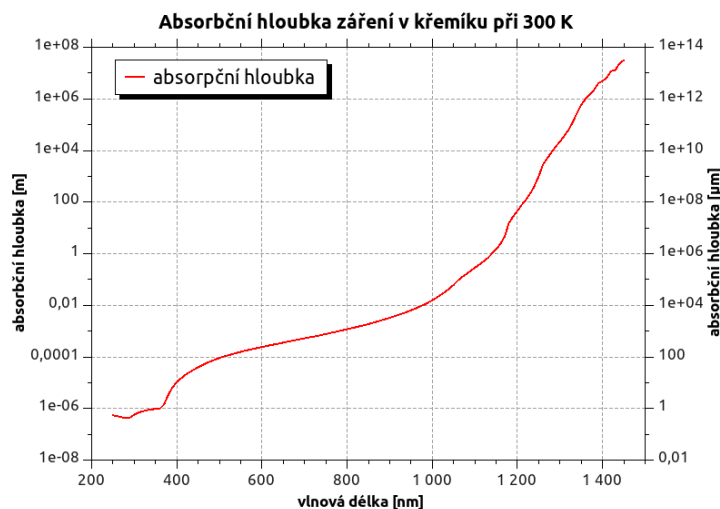
3.1.1 Nitridové masky opracované působením laserového svazku

Princip tohoto způsobu vytváření masek spočívá v odstranění SiN_x vrstvy pomocí působení laserového záření. Laserové záření je absorbováno v nitridu nebo křemíku (dle vlnové délky záření), kde dojde k lokálnímu zahřátí materiálu a jeho ablaci. Při vlnových délkách laserového záření kolem 1064 nm dochází k absorpci až v křemíku (Obr. 3.1). Tímto způsobem dochází ke vzniku většího množství defektů než v případě laserového záření v oblastech 532 nm (zelený laser) resp. 355 nm (UV laser).

S různou vlnovou délkou se mění optický absorpční koeficient α a tudíž i hloubka vniku světelného záření do polovodiče. Pokud jde o krystalický křemík, tak se hodnota koeficientu $1/\alpha$ pohybuje od $10^3 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku $1,1 \mu\text{m}$ až po $10^{-2} \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 350 nm. Tabulka 3.1 ukazuje vybrané hodnoty vlnových délek a jim odpovídající penetrační hloubky do monokrystalického křemíku [4].

Tabulka 3.1: Penetrační hloubka el.mag. záření do krystalického Si. [4]

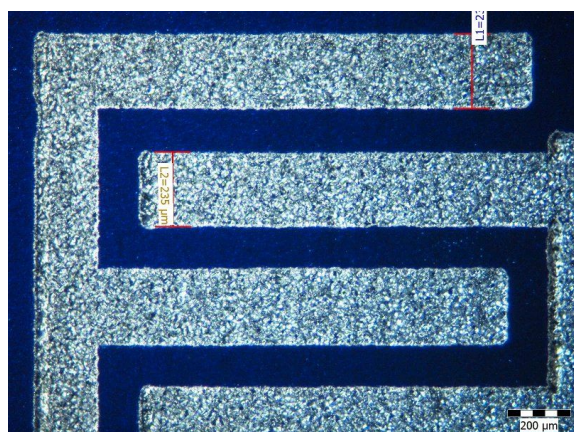
Vlnová délka [nm]	400	450	500	550	600	650	700
Penetrační hloubka [μm]	0,1	0,4	0,9	1,5	2,4	3,4	5,2
Vlnová délka [nm]	760	800	850	900	940	1000	1050
Penetrační hloubka [μm]	8,4	11	19	33	54	156	613



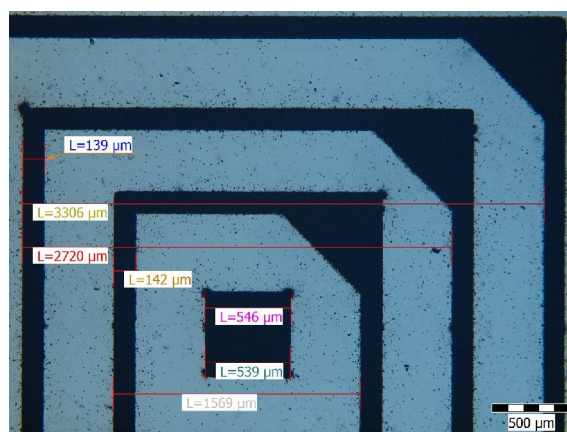
Obr. 3.1: Závislost penetrační hloubky na vlnové délce elektromagnetického záření. [5]

Výhody laserového vytváření motivů jsou ve velké variabilitě motivů, které se zhotovují přímo z digitálních předloh a není třeba vytvářet jiné mezikroky. Mezi další výhody patří také rychlost vytváření takovýchto motivů. V případě vychylování laserového svazku pomocí tzv. „galvo hlavy“ je možno vytvářet motivy až s rychlostí 5000 mm/s [15]. Princip takového

vychylování laserového svazku spočívá ve dvou nezávisle pohyblivých zrcadlech, které každé vychylují parsek v ose X a Y.



Obr. 3.2: Příklad laserového (vláknový, 1064 nm) odstranění SiN_x vrstvy „hřebenová struktura“. [15]



Obr. 3.3: Příklad laserového (vláknový, 1064 nm) odstranění SiN_x vrstvy-testovací obrazec „Reimer“. [16]

Ukázky laserového strukturování vrstev nitridu křemíku jsou na Obr. 3.2 a Obr. 3.3.

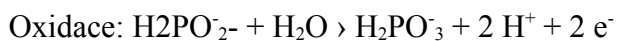
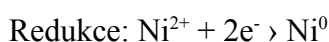
3.2 Selektivní depozice kovových vrstev

3.2.1 Bezproudé-chemické pokovení Ni

Ve srovnání s galvanickými procesy je přínosem velká hloubková účinnost lázně, což je důležité např. při pokovování různých dutin a členitých povrchů. Bezproudově vyloučené povlaky mají ve srovnání s galvanicky vyloučenými povlaky často i výhodnější vlastnosti pro některé speciální aplikace. Nevýhodou je nižší vylučovací rychlost ve srovnání s galvanickými procesy. Postupně bylo vyvinuto, pro nejrůznější aplikace, mnoho různých typů chemických niklovacích lázní.

Princip

Chemicky se jedná o autokatalytickou redukci niklových iontů na kov. Zde jsou uvedeny základní reakce:

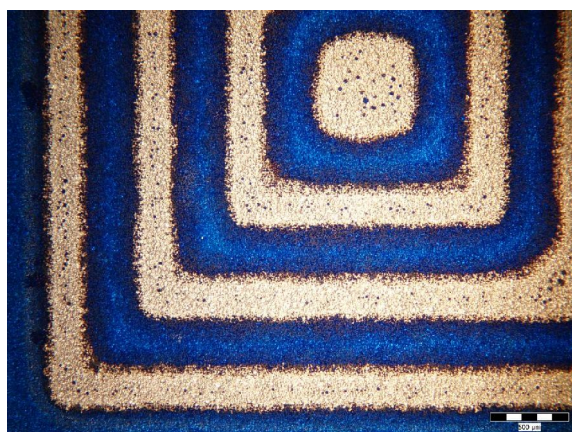


Shora uvedený reakční mechanismus se vztahuje k alkalické niklovací lázni. Dále je možno použít také kyselé bezproudé niklovací lázně [3].

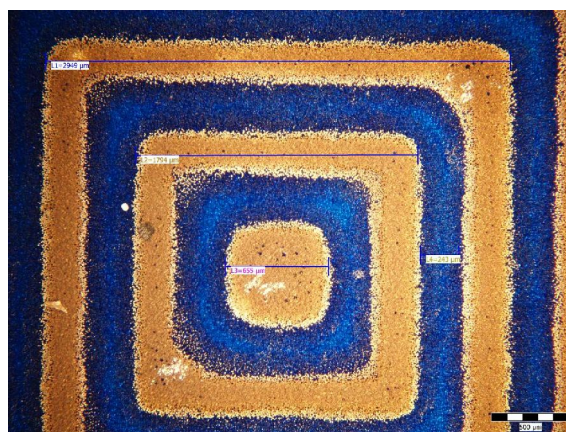
Při použití vhodného redukčního činidla, lze chemicky deponovat niklové vrstvy i na polovodiče, jak je uvedeno v této práci na křemík – Si. Jako katalytické jedy mohou při chemickém niklování působit i stopová množství některých kovů např. olovo, cín, zinek, molybden, wolfram, kadmium, bismut, arsen a antimon. Ionty těchto kovů mohou být proto i příčinou různých provozních potíží. Za definovaných podmínek mohou tyto katalytické jedy sloužit i jako stabilizátory lázní [3].

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny 2 kroky při selektivním chemickém pokovení.

Na Obr. 3.4 je tvar požadovaného motivu po chemickém odstranění SiN_x a na sousedním obrázku Obr. 3.5 je již obrazec po depozici chemického niklu (změna barvy motivu)



Obr. 3.4: Vyleptaný motiv „Reimer“ do nitridové masky. [2]



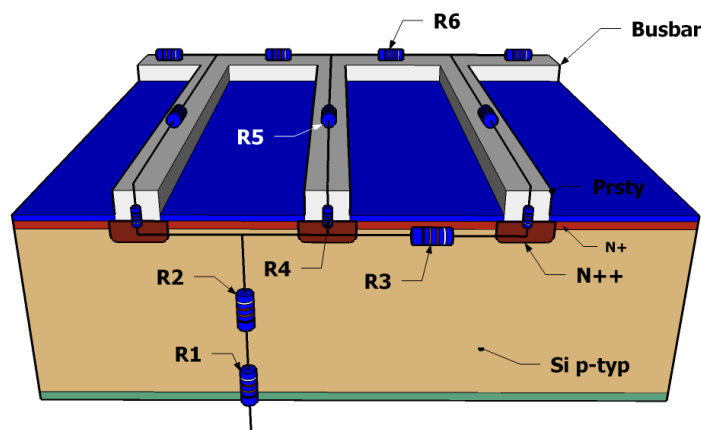
Obr. 3.5: Motiv „Reimer“ po chemické depozici niklu. [15]

Elektrická rezistivita čistého metalurgického niklu je $6.05 \mu\Omega/\text{cm}$. Povlaky bezproudého niklu obsahující 6 až 7 % fosforu a mají po vyloučení povlaku rezistivitu 52 až $68 \mu\Omega/\text{cm}$. Povlaky s 2,2 % P mají elektrickou rezistivitu $30 \mu\Omega/\text{cm}$, zatímco povlaky s 13% P mají výrazně vyšší rezistivitu $110 \mu\Omega/\text{cm}$. Tepelným zpracováním se elektrická rezistivita snižuje [3].

3.3 Analýza vlastností kovových vrstev

3.3.1 Odporové ztráty ve FV člancích

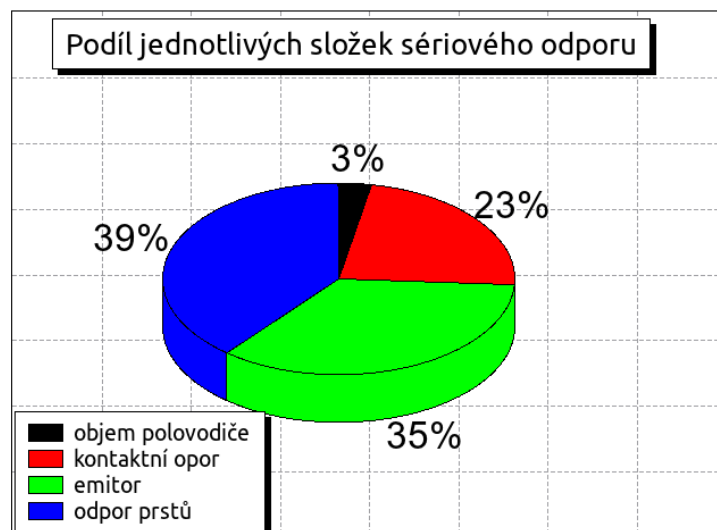
Jednotlivé odporové ztráty v různých částech článku zobrazuje Obr. 3.6.



Obr. 3.6: Rozdělení odporových ztrát na jednotlivé příspěvky. [1]

Kde jednotlivé odpory znamenají:

- R1- odpor rozhraní kov-polovodič na zadní straně,
- R2- odpor polovodičového materiálu (báze),
- R3- odpor emitoru mezi dvěma prsty,
- R4- odpor rozhraní kov-polovodič na přední straně,
- R5- vlastní odpor prstu,
- R6- odpor sběrníkové metalizace (busbar) [1].



Obr. 3.7: Podíl jednotlivých složek na celkovém sériovém odporu FV článku. [14]

Velikost jednotlivých složek sériového odporu je zobrazena na Obr. 3.7. Vzhledem k velkému podílu ztrát v prstech (39%), má i malé zlepšení relativně velkou odezvu na celkové odporové ztráty FV článků.

3.4 Důsledky parazitních odporů

3.4.1 Vliv sériového odporu

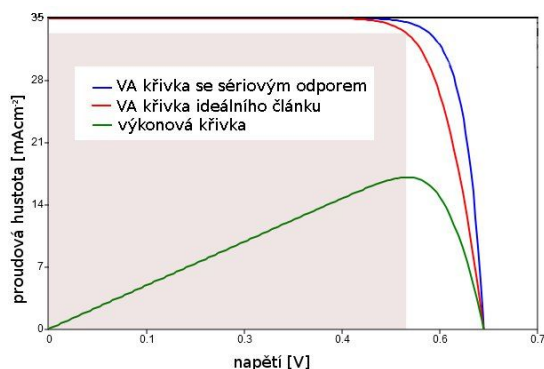
Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách sériový odpor má původ ve třech místech struktury FV článku:

- 1) odpor báze a emitoru,
- 2) kontaktní odpor křemík-kovový kontakt na přední a zadní straně,
- 3) vlastní odpor přední a zadní metalizace. V případě zřetěžených článků, pak i odpor samotného propojovacího vodiče.

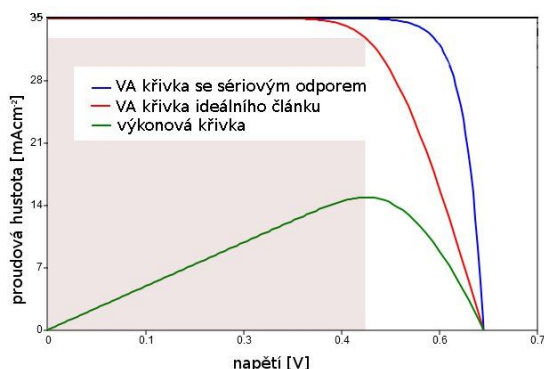
$$I = I_L - I_0 \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right] \quad 3.1$$

Nejvíce ovlivňuje sériový odpor fill factor FF. V případě velmi velkých hodnot R_s ovlivní významně i proud nakrátko I_{sc} . Napětí naprázdno V_{oc} není sériovým odporem ovlivněno z důvodu neexistence toku proudu přes sériový odpor – všechny generovaný proud teče přes strukturu PN přechodu [6].

Vliv sériového odporu FV článku na VA křivku je znázorněn červenou barvou na Obr. 3.8 ($R_s=1 \Omega$) a Obr. 3.9 ($R_s=3 \Omega$). Modře je vykreslena křivka ideálního článku bez sériového odporu. Zelené křivky ukazují, projevy sériového odporu na výkonových ztrátách článku – posunutí bodu maximálního výkonu.



Obr. 3.8: Porovnání ideální VA křivky FV článku (0Ω) a VA křivky se sériovým odporem 1Ω . [6]

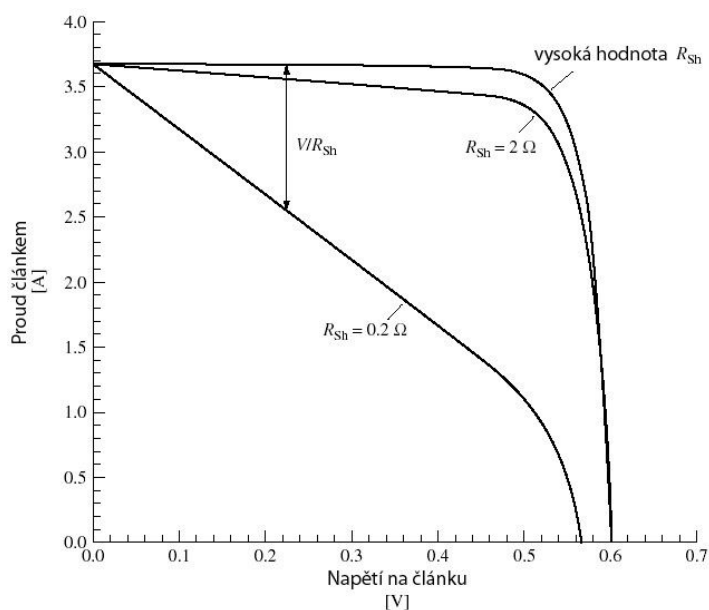


Obr. 3.9: Porovnání ideální VA křivky FV článku (0Ω) a VA křivky se sériovým odporem 3Ω . [6]

3.4.2 Vliv paralelního odporu

Dalším parazitním odporem ve struktuře FV článku je paralelní odpor R_{SH} . Většinou je způsoben chybou ve výrobním postupu. Nízký paralelní odpor R_{SH} vytváří paralelní cestu generovanému fotoproudu a tím snižuje proud tekoucí přes externí kontakty FV článku. Vliv paralelního odporu je větší při nižších intenzitách osvětlení díky změně poměru I_L a I_{rsh} [6].

$$I = I_L - I_0 \exp\left[\frac{qV}{nkT}\right] - \frac{V}{R_{SH}} \quad 3.1$$



Obr. 3.10: Vliv paralelního odporu na VA křivku solárního článku. [8]

Obě hodnoty odporů lze odečíst z grafů ze směrnic křivek v daných oblastech. Pro paralelní odpor R_{SH} je to „vodorovná“ část blízko oblasti I_{SC} a pro sériový R_S „svislá“ část I-V křivky blízko U_{OC} [8].

Paralelní odpor R_{SH} nemá vliv na proud nakrátko I_{SC} , ale snižuje FF a při nízkých hodnotách R_{SH} i napětí naprázdno- V_{OC} . Naopak sériový odpor R_S nemá vliv na napětí naprázdno V_{OC} , snižuje FF a při velkých hodnotách i proud nakrátko- I_{SC} .

4 Výsledky disertace

4.1 Selektivní metalizace přední strany FV článků

Kapitola je zaměřena na technologie chemické depozice niklu na křemíkový substrát. Výsledky dosažené v této kapitole jsou využity v další kapitole 4.2 (strana 20), v které je navržen nový typ přední metalizace FV článku, založený na zárodečném niklovém kontaktu deponovaného chemickou cestou.

4.1.1 Chemická depozice Ni kontaktů na povrchu FV článků

Pro analýzu elektrických vlastností kontaktů na povrchu FV článků byly připraveny vzorky následujícím technologickým postupem:

1. Odleptání pohmožděné vrstvy a texturace povrchu,
2. POCl_3 difúze,
3. LPCVD depozice Si_3N_4 vrstev,
4. laserové nebo chemické (leptací pasta) odstranění SiN_x v místech budoucích zamýšlených kontaktů,
5. selektivní difúze POCl_3 přes SiN_x masku,
6. depozice základní vrstvy Ni,
7. žihání.

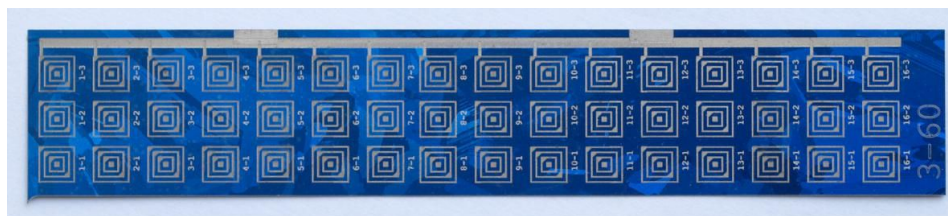
Nikl se deponuje pouze v místech, kde je přímý kontakt lázně s nezamaskovaným, nezoxidovaným křemíkem. Případné další zesílení lze provést v chemické niklovací lázni bez přídavku redukčního činidla.

Kontaktní žihání

Motivací tohoto testu je analýza chování měrného kontaktního odporu při žihání chemicky vytvořených kontaktů. Proces žihání je důležitý pro vytvoření Si-Ni vazeb, které vedou ke snížení kontaktního odporu.

Při teplotách kolem 230 °C začíná Ni reagovat s křemíkem na Ni_2Si . Další zvyšování teploty na 350-700 °C vede ke vzniku sloučeniny NiSi [12].

Vzorky byly připraveny selektivním odstraněním vrstvy SiN_x pomocí velmi mělkého laserového rýhování. Na Obr. 4.1 je ukázka jednoho vzorku. Vzorek obsahuje 48 testovacích motivů.

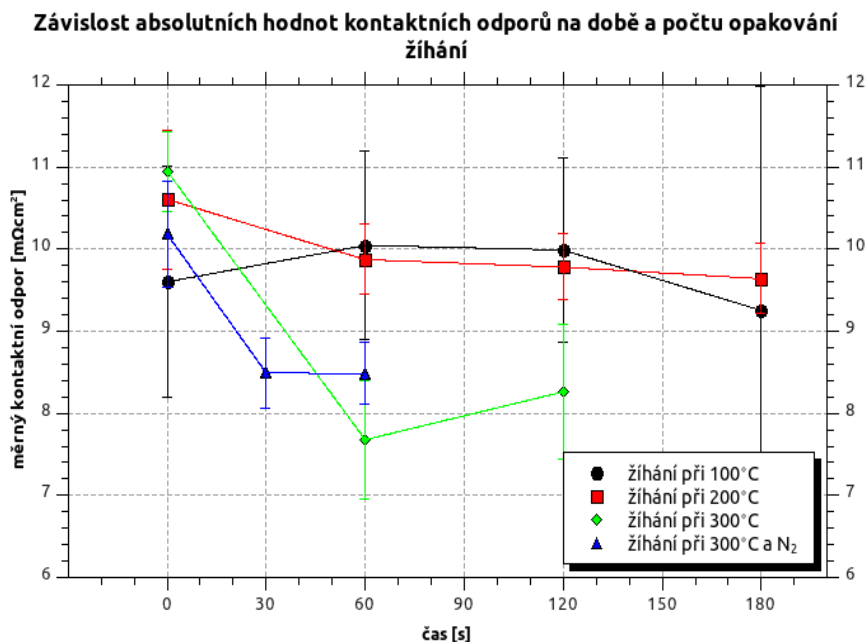


Obr. 4.1: Vzorek pro analýzu vlastností chemických kontaktů. Obsahuje 48 testovacích motivů.

Žihání vzorků s připravenými testovacími motivy bylo provedeno při následujících teplotách prostým položením na temperovanou základnu („hotplate“):

- 100 °C - bez ochranné atmosféry ;
- 200 °C - bez ochranné atmosféry ;
- 300 °C - bez ochranné atmosféry ;
- 300 °C – s atmosférou N₂.

Shrnutí výsledků žihání chemického niklu je zobrazeno na Obr. 4.2.

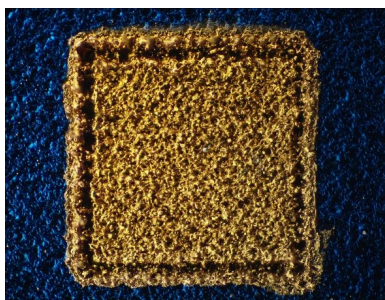


Obr. 4.2: Absolutní změny kontaktních odporů při různých podmínkách žihání.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny kontaktní plošky obrazce „Reimer“ před žiháním (Obr. 4.3), po žihání 300 °C (Obr. 4.4) a po žihání 300 °C v atmosféře N₂ (Obr. 4.5). U vzorků žihaných na 300 °C se objevilo optické zežloutnutí jak pro vzorek žihaného v ochranné atmosféře tak i bez ochranné atmosféry. Vzhledem k tomu, že vzorky již nešly po žihání chemicky pokovit (měřeno vážením), lze usoudit, že na povrchu se vytvořil oxid, který zamezuje dalšímu chemickému pokovení.



Obr. 4.3: Středová kontaktní ploška obrazce „Reimer“ bez žihání. Rozměry plošky 560x560 μm. Optický mikroskop.



Obr. 4.4: Středová kontaktní ploška obrazce „Reimer“ po žihání při 300 °C po dobu 180 s. Optický mikroskop.



Obr. 4.5: Středová kontaktní ploška obrazce „Reimer“ po žihání při 300 °C po dobu 180 s v atmosféře N₂. Optický mikroskop.

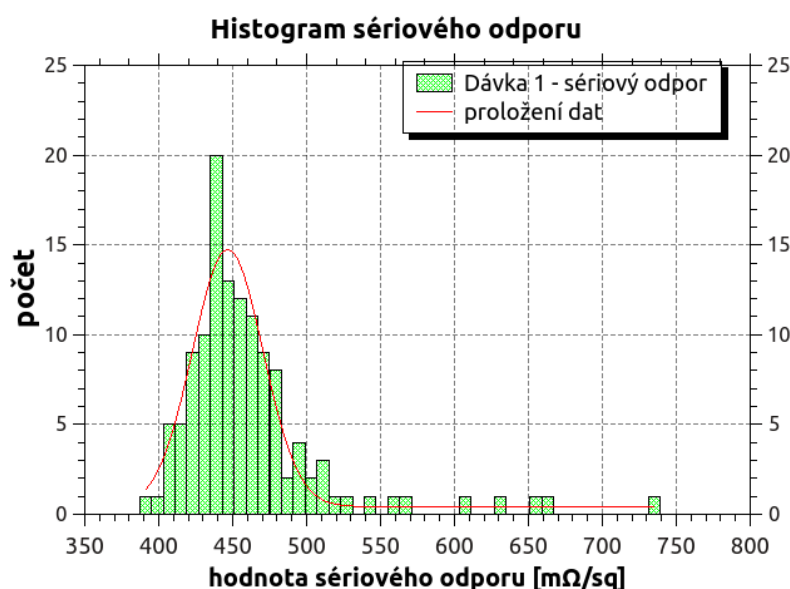
Ze souhrnných výsledků zobrazených na Obr. 4.2 vyplývá, že vyšší teplota žihání

významně snižuje měrný kontaktní odpor. Doba dostatečná pro vytvoření rozhraní Si – Ni je 30 s. Opakováním žihání stejného vzorku se buď měrný kontaktní odpor dále nesnižuje nebo se v některých případech dokonce zvyšuje.

Vzhledem k oxidaci povrchu při vyšších teplotách a delších časech žihání je vhodnější provádět proces žihání až po galvanickém nebo jiném zesílení kontaktu. Při dobách žihání kolem 30 s nebyla oxidace pozorována a vzorky bylo možno dále chemicky pokovit. Použití ochranné atmosféry N_2 není tedy při těchto kratších časech žihání nutné. Výsledky měrného kontaktního odporu u vzorků žihaných v ochranné atmosféře a bez ochranné atmosféry jsou srovnatelné.

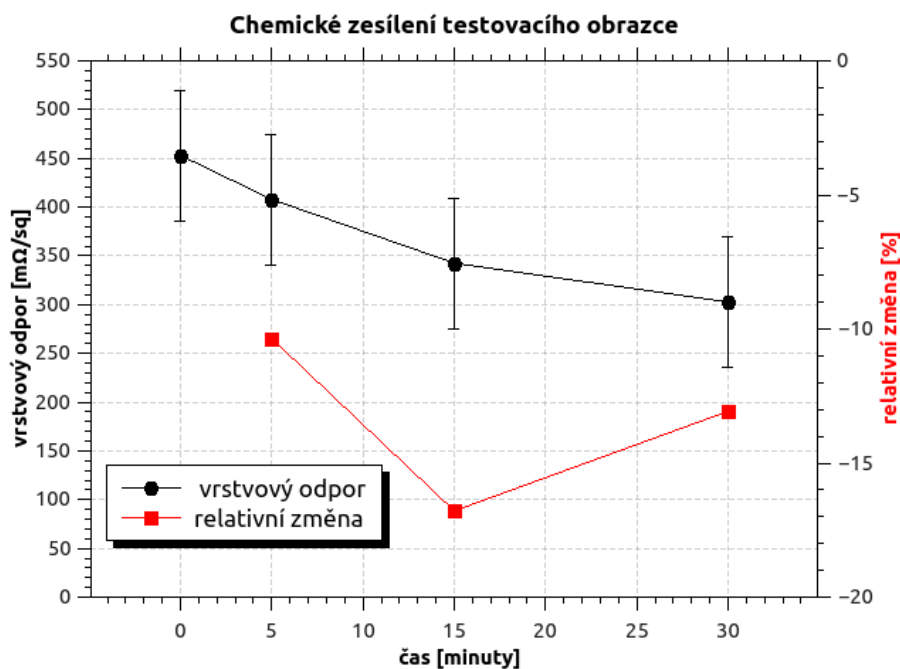
Sériový odpor zárodečných niklových kontaktů

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.3.1 na straně 9, je sériový odpor jedním z parazitních odporů ve struktuře FV článku. Vzhledem k tloušťce (dle podmínek depozice 0,5-3 μm) zárodečného niklového kontaktu dosahuje sériový odpor relativně vysokých hodnot. U zkoumané série 129 vzorků připravených za stejných podmínek dosahovala průměrná hodnota sériového odporu 450 m Ω /sq. Informace o rozložení hodnot sériového odporu ve zkoumané dávce testovacích motivů poskytuje Obr. 4.6.



Obr. 4.6: Histogram sériového odporu zárodečných niklových kontaktů.

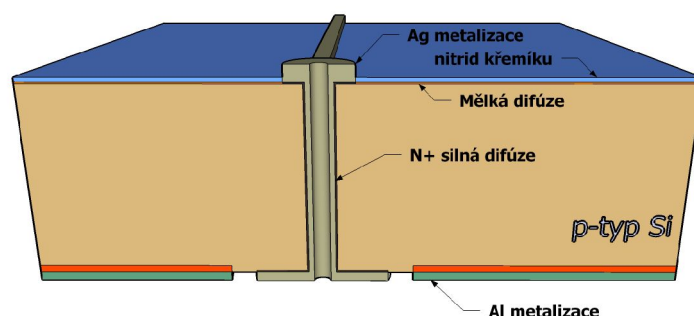
Zhotovené kontakty je nutné pro funkční FV články dále zesílit (zvětšit průřez vodiče). Pro ověření možnosti snížení sériového odporu pomocí chemické lázně byl proveden následující experiment. Byly použity testovací motivy z předešlého testu. Doba depozice v chemické lázni byla 5, 15 a 30 minut. Lázeň má schopnost deponovat další kov pouze na „zárodečné“ kontakty. Mezi jednotlivými časovými intervaly depozice byl změřen sériový odpor. Výsledky shrnuje Obr. 4.7.



Obr. 4.7: *Průměrné hodnoty sériového odporu a jejich relativní změně v závislosti na době chemického zesílení testovacích motivů.*

Výsledky chemického zesílení kontaktů ukazují, že k poklesu sériového odporu dochází, nicméně pro dosažení standardních účinností FV článku je nutné zesílit kontakty jinými metodami. Například pomocí nově navržené metody zesílení kontaktu pomocí měděného drátku a vodivého lepidla uvedené v kapitole 4.2 na straně 20.

4.1.2 Kontakty v objemu FV článků



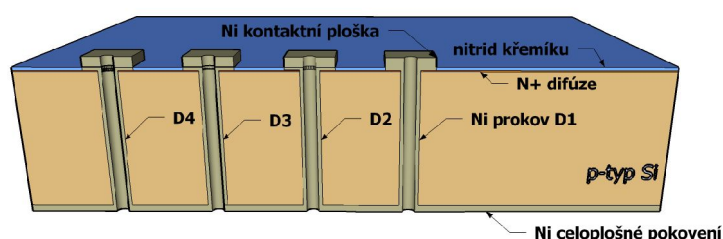
Obr. 4.8: Schématické znázornění solárního článku se strukturou MWT.

Stejně jako u desek plošných spojů je důvod vytvoření prokovených otvorů převést „signál“ z jedné strany FV článku na druhou. V případě FV článků je to také z důvodu menšího zastínění přední plochy a jednoduššího spojování jednotlivých článků do větších celků. V případě klasického solárního článku s p-typovým substrátem se nachází kontakty na přední (záporný pól) a zadní straně (kladný pól). Při spojování (pájení, lepení vodivým lepidlem apod.) je tedy nutné provádět tyto operace z obou stran. Tyto oboustranné operace a s tím spojené manipulace s křehkými články odpadají v případě článků s vyvedenými přenými kontakty na zadní stranu. V průmyslové praxi se tyto struktury nazývají Metalization Wrap Through. Schématické znázornění struktury MWT je zobrazeno na Obr. 4.8.

Analyza elektrických vlastností chemicky deponovaných kontaktů

Popis experimentu

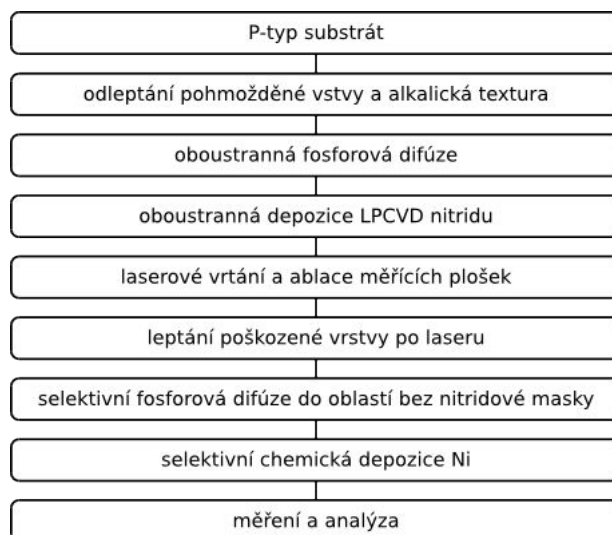
Byly analyzovány elektrické vlastnosti chemicky deponovaných kontaktů. Pro tento experiment byla zvolena testovací struktura zobrazená na Obr. 4.9. Přední plošky byly kontaktovány pomocí měřících hrotů a odpor prokovů byl 4 bodově měřen vůči společné spodní elektrodě.



Obr. 4.9: Testovací struktura pro analýzu elektrických vlastností prokovených děr.

Prokovy s jednou dírou

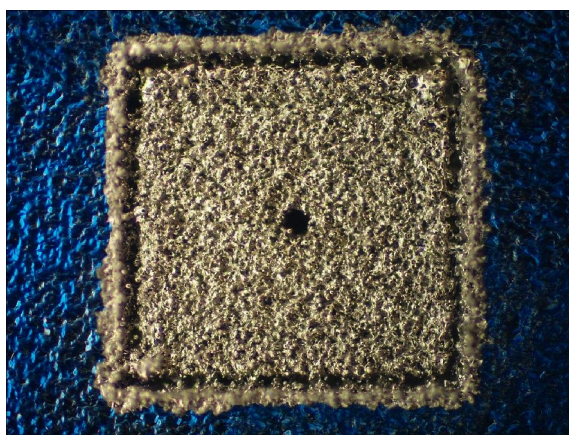
Vzorky byly připraveny dle níže uvedeného technologického postupu (viz Obr. 4.10).



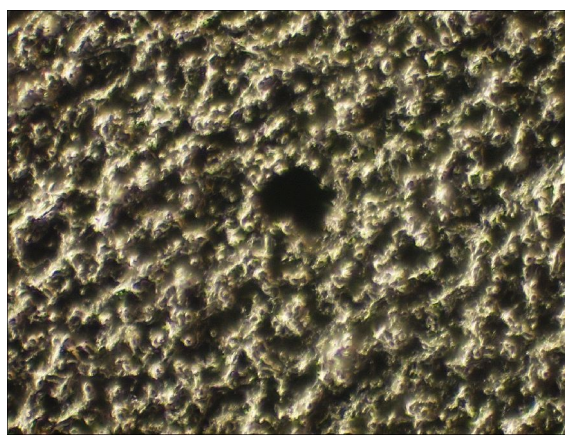
Obr. 4.10: *Technologický postup zhotovení vzorků pro analýzu elektrických vlastností prokovů.*

Depoziční časy pro skupinu vzorků byly zvoleny: 1; 1,5; 2 a 3 minuty. Byl analyzován odpor jednotlivých kontaktů a vrstvý odpor zadního (celoplošného) kontaktu.

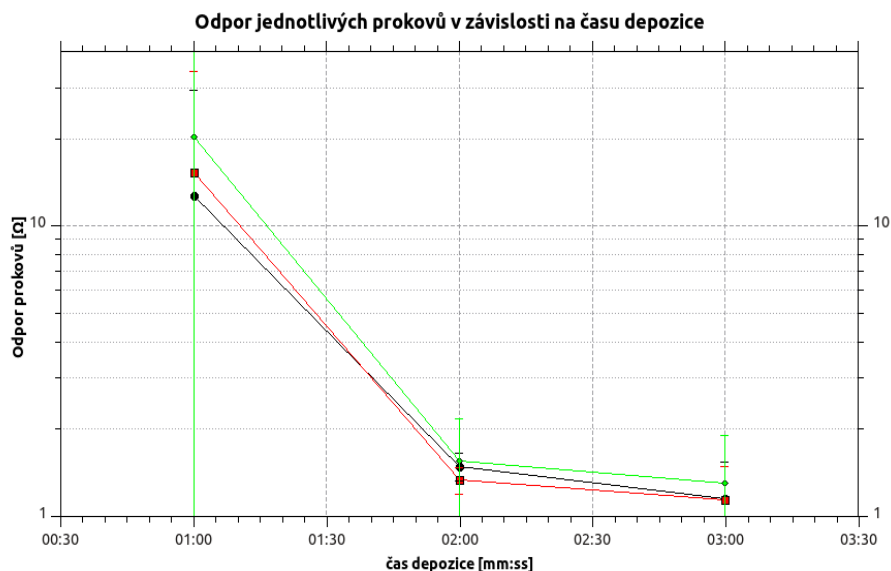
Díry byly laserově vrtány ze stejné strany jako bylo provedeno lokální odstranění dielektrické SiNx vrstvy. To znamená, že strana kónusového tvaru díry s větším poloměrem je ze strany pohledu Obr. 4.11 a naopak strana díry s menším poloměrem je zobrazena na Obr. 4.12.



Obr. 4.11: *Kontaktní ploška s jedním prokovem – po depozici základní Ni vrstvy. Rozměry plošky 560x560 μm . Průměr díry 35 μm .*



Obr. 4.12: *Pohled na zadní (celoplošný) kontakt stejného prokovu jak na Obr. 4.11. Průměr díry 35 μm .*

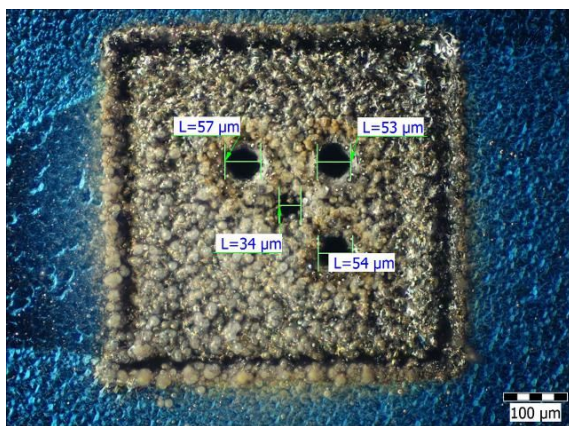


Obr. 4.13: Závislost průměrných hodnot odporu jednotlivých proků D1, D2, D3 na době depozice. D1 zelená, D2 červená, D3 černá barva.

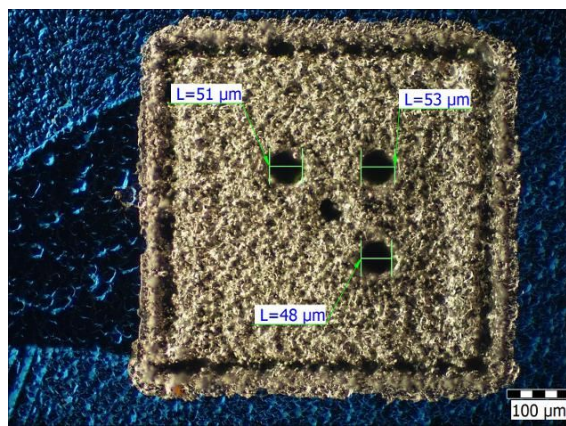
D1, D2 a D3 na Obr. 4.13 označují prokovy jednoho testovacího motivu (viz schématické znázornění testovacího obrazce na Obr. 4.9). Na jednom vzorku bylo umístěno 25 testovacích motivů v matici 5x5. Z Obr. 4.13 je patrné, že odpor proků se po jednotlivých dobách chemické depozice postupně snižuje k hodnotě blízké 1,2 Ω . Delší časy (více než 3 minuty) depozice Ni měly na snížení odporu prokovu již jen minimální vliv. Rozpětí měřených hodnot, zvláště po první minutě depozice, bylo velké a po 2 a 3 minutách depozice se postupně snižovalo. Toto chování bylo způsobeno pomalejší depozicí Ni povlaku uvnitř vrtané díry než na povrchu křemíkového substrátu. Některé otvory tedy neměly po první minutě depozice vytvořenou souvislou vrstvu Ni. Vzhledem k relativně vysoké hodnotě odporu jednoho prokovu, bylo přistoupeno k experimentu s více paralelními děrami.

Prokovy s více paralelními děrami

Vzorky s více paralelními děrami byly připraveny stejným způsobem jako vzorky s jednou dírou, tj. dle technologického postupu zobrazeného na Obr. 4.10. Paralelními děrami je míněna struktura více proků umístěných v rámci jedné kontaktní plošky testovacího motivu. Obr. 4.14 zobrazuje kontaktní plošku testovacího motivu se 4 laserově vrtanými otvory po operaci vrtání a odstranění nitridu. Obr. 4.15 již zobrazuje stejnou kontaktní plošku po provedení chemické depozice Ni. Mírné tvarové nepřesnosti mezi těmito dvěma obrázky jsou způsobeny měřením po laserovém opracování, kdy je ještě vzorek částečně pokryt zpětně napařeným materiálem a po odleptání těchto zbytků.

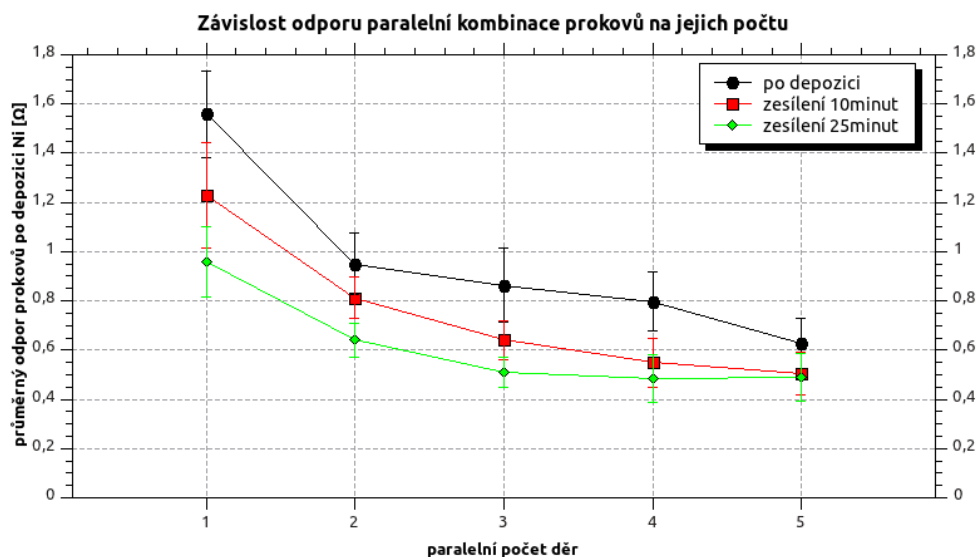


Obr. 4.14: Kontaktní ploška se 4 děrami po laserovém opracování. Pohled na vstupní stranu laserového paprsku při vrtání. Optický mikroskop.



Obr. 4.15: Stejná kontaktní ploška jak na Obr. 4.14 po depozici základní vrstvy Ni. Optický mikroskop.

Výsledky elektrických měření jsou zobrazeny na Obr. 4.16.



Obr. 4.16: Vliv počtu paralelních děr a době chemického zesílení na výsledném odporu prokůvů.

Ukazuje se, že největšího poklesu odporu dochází při paralelním spojení dvou prokůvů. Větší množství paralelních otvorů již nepřináší výraznější pokles celkového odporu prokovu. Nejnižších hodnot odporů prokůvů bylo dosaženo po chemickém 25 minutovém zesílení, kde rozdíly odporu mezi počtem 3, 4 nebo 5 otvorů jsou již minimální.

I přes snahy chemického zesílení a paralelní kombinace děr bylo dosaženo jen hodnoty odporu prokovu 0,5 Ω . Což je v porovnání s prokovy vyplněnými tlustovrstvými pastami zhruba 100 násobné (odpor tlustovrstvého prokovu cca 4-6 m Ω) a je zřejmé, že bez dalšího zesílení nelze těchto struktur pro výrobu křemíkových solárních článků efektivně využít. Nicméně selektivní chemická depozice Ni je vhodná jako zárodečná vrstva pro další kroky metalizace.

4.2 Návrh a optimalizace nového typu zesílení Ni kontaktů

4.2.1 Úvod

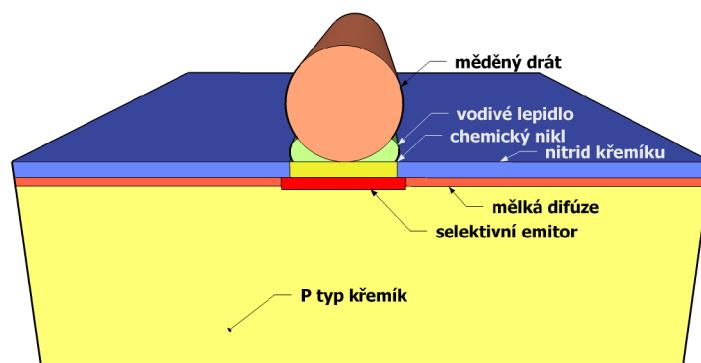
Kapitola popisuje technologický postup zhotovení struktur předních kontaktů solárních článků založených na zárodečné vrstvě chemického niklu, jejich zesílení pomocí měděného drátku a vodivého lepidla a měření jejich elektrických vlastností.

Princip výše zmíněného zesílení (snížení odporu, zvýšení průřezu vodiče) metalizace spočívá v mechanickém a elektrickém spojení měděného drátku s niklovým kontaktem vytvořeným na povrchu solárního článku. Spoj je realizován pomocí vodivého lepidla. Lepidlo je jednosložkový, stříbrem plněný epoxid.

Výhody uvedené metody:

- nižší sériový odpor kontaktu ve srovnání se sítotiskem (viz porovnání Tabulka 4.1 a Tabulka 4.2)
- nižší stínění přední strany díky úzkým prstům,
- nižší stínění přední strany díky možnosti vynechání busbaru,
- vysoké Aspect Ratio (AR) – poměr výšky k šířce kontaktu,

Na Obr. 4.17 je struktura drátkového kontaktu zobrazena schématicky a na Obr. 4.18 je výbrus dokončené struktury kontaktu na křemíkovém substrátu.



Obr. 4.17: Schématické znázornění zesíleného kontaktu chemického niklu pomocí měděného drátku a vodivého lepidla.

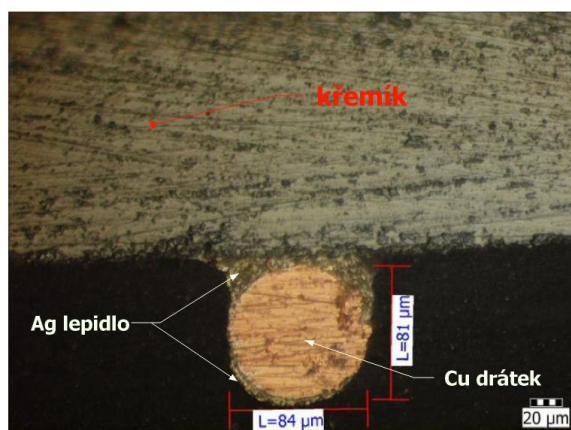
Na Obr. 4.18 a Obr. 4.19 jsou zobrazeny příčné výbrusy dvou porovnávaných typů metalizace určených pro přední stranu FV článku. Substrátem pro oba dva snímky je texturovaná křemíková deska. Již zmíněný faktor tvaru kontaktu tzv. Aspect Ratio dosahuje u Obr. 4.18 (drátek) hodnoty 1 a u Obr. 4.19 (sítotisk) 0,28.

$$AR = \frac{\text{výška}}{\text{šířka}} \quad [-]$$

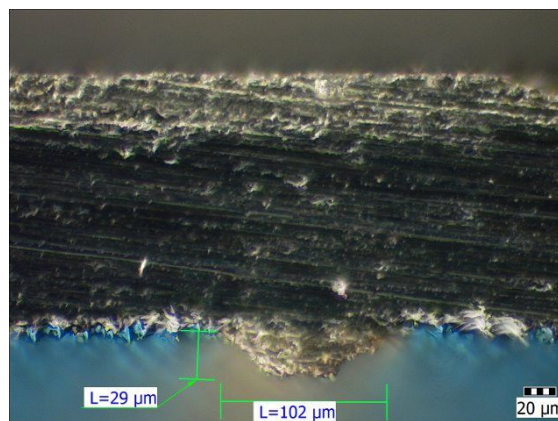
$$AR_{\text{drátek}} = \frac{\text{výška}}{\text{šířka}} = \frac{91}{91} = 1 \quad [-]$$

(při započítání přesáhlého vodivého lepidla)

$$AR_{\text{drátek}} = \frac{\text{výška}}{\text{šířka}} = \frac{29}{102} = 0,28 \quad [-]$$



Obr. 4.18: Příčný výbrus strukturou kontaktu s drátkem. Popis struktura směrem od horní části obrázku: 1) podklad křemík s Ni vrstvou (Ni vrstva není viditelná), 2) Ag lepidlo, 3) Cu drátek. Optický mikroskop.



Obr. 4.19: Příčný výbrus standardního jednorůchodového, sítotiskového prstu na povrchu pření strany FV článku a jeho zakótované rozměry. Částečně viditelná antireflexní vrstva – modré oblasti. Optický mikroskop.

Tabulka 4.1 Typické rozměry sítotiskových prstů a jejich sériové odpory. Stříbrná přední metalizace.

sítotisk	výška [μm]	šířka [μm] (zastínění v kolmém směru)	průřez [μm ²]	odpor [mΩ/cm]
	25	110	2750	100-150 ^{*1}
	10	70	700	300-350 ^{*1}
	6	55	330	> 600 ^{*1}
	102	29	2958	257 ^{*2}

^{*1}=[9], ^{*2}=[10]

Tabulka 4.2 Typické rozměry předkládané drátkové technologie.

drátek	průměr [μm] (zastínění v kolmém směru)	-	průřez [μm ²]	odpor [mΩ/cm]
	84 ¹	-	5542	55
	79 ²	-	4902	44

Pozn.: 1) s povrchovou úpravou Sn, 2) bez povrchové úpravy.

4.2.2 Analýza dokončených článků

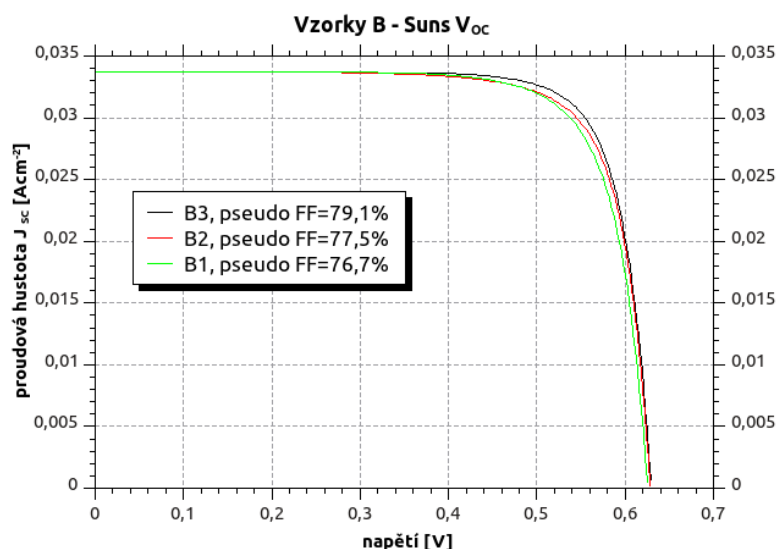
Skupina vzorků B

Hlavní rozdíl mezi vzorky B2 a B3 a potažmo celé skupiny A je v technologii lepení drátku na zárodečný Ni kontakt. Vzorek B2 byl přilepen inovovaným způsobem pomocí vyhřívaného a přitlačného systému zatímco vzorek B3 a celá skupina A starším způsobem bez přitlačného systému.

Výhoda nového systému spočívá ve větší homogenitě mechanického a tím pádem i elektrického spojení drátku a lepidla s Ni zárodečnou vrstvou. Nicméně i přes snížení množství vodivého lepidla ve spoji mají vodiče větší šířku než při přípravě předchozím způsobem. Toto rozšíření šířky prstů (větší zastínění aktivní plochy FV článku) je zřetelně vidět na poklesu proudové hustoty J_{SC} (Tabulka 4.3).

K opačným efektům dochází u vzorku B3. Drátek je přilepen starší technologií s menší homogenitou, ale s optimalizovanou šířkou prstů. Menší stínění se odráží na proudové hustotě J_{SC} , která dosahuje nejvyšší dosažené úrovně ze všech zkoumaných vzorků (Tabulka 4.4).

Suns V_{OC}



Obr. 4.20: VA křivky bez vlivu sériového odporu – Suns V_{OC} .

Měření suns- V_{OC} potvrzuje, že články mají, stejně jako vzorky A, vysoké hodnoty paralelního odporu R_{SH} a relativně vysoký potenciál teoreticky dosažitelného FF.

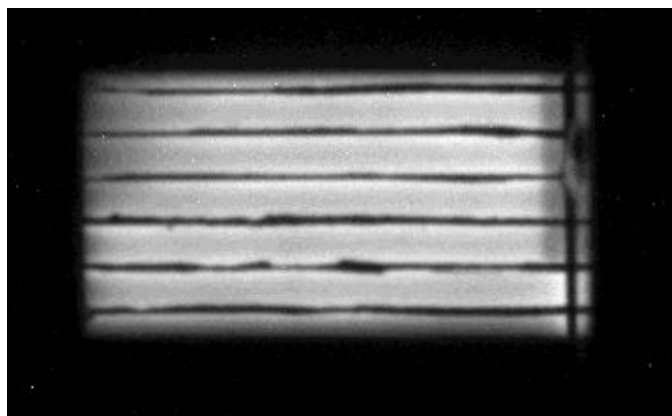
Elektrické charakteristiky

Vzorek B2

„Vzorek s homogenním elektrickým kontaktem“

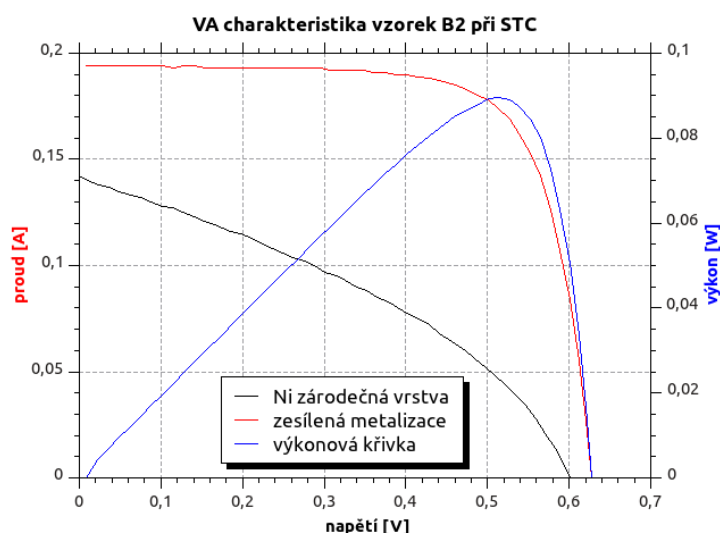
Tabulka 4.3 Výsledky vzorku B2 na solárním simulátoru a suns V_{OC} .

U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_M [W]	FF [%]	Pseudo FF [%]	Účinnost [%]	Celková plocha článku [mm ²]	J_{SC} [mAcm ²]
0,6234	0,1880	0,5140	0,1680	0,0863	73,67	77,5	16,94	509,7	36,88



Obr. 4.21: Elektroluminiscence vzorku B2. V pravé části je vidět přitlačný kontakt pro přiložení napětí.

Jak již bylo zmíněno výše, vzorek B2 má díky neoptimalizovanému systému lepení širší prsty, ale výbornou homogenitu elektrického spojení drátku se zárodečným kontaktem Ni. Tento fakt je zřetelně vidět na elektroluminiscenci FV článku na Obr. 4.21. Snížení sériového odporu se kladně projevilo na zvýšení fill factoru VA křivky měřené při osvětlení (VA křivka zobrazená na Obr. 4.22). Na stejném obrázku je černě zobrazena VA křivka stejného vzorku před zesílením prstů pomocí drátku.



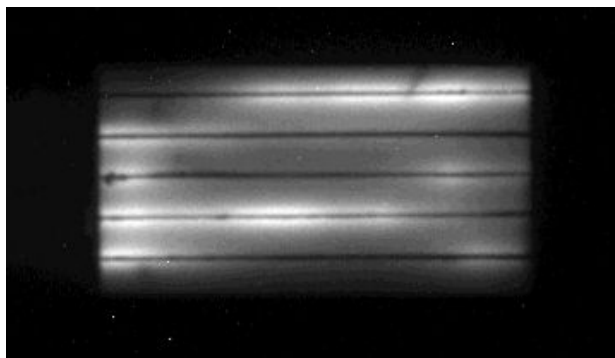
Obr. 4.22: VA charakteristiky vzorku B2 při osvětlení. Černá křivka po depozici chemického niklu. Červená křivka po zesílení chemického niklu drátku. Modrá-výkonová křivka po zesílení.

Vzorek B3

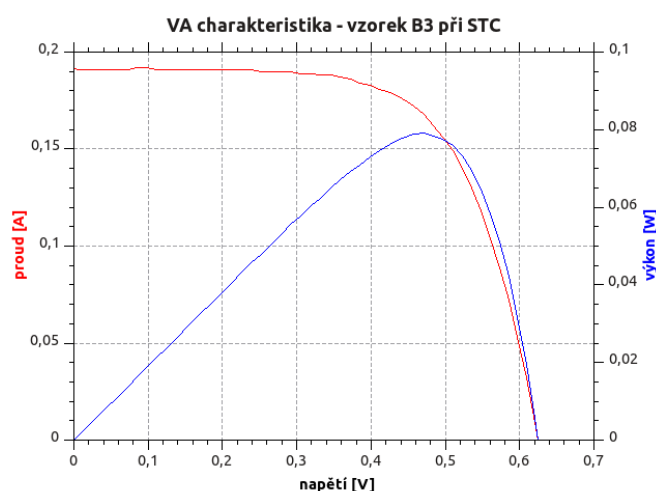
„Vzorek s nízkou šířkou prstů“. Z elektroluminiscence vzorku B3 (Obr. 4.23) je zřejmé, že elektrický kontakt drátku a zárodečného Ni kontaktu není zcela homogenní. To má za následek zvýšení sériového odporu a snížení fill factoru (oproti pseudo fill factoru). Oba tyto jevy lze pozorovat na VA křivce při osvětlení (Obr. 4.24) a v číselném vyjádření v souhrnné tabulce 4.4.

Tabulka 4.4 Výsledky vzorku B3 na solárním simulátoru a $suns V_{OC}$

U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_M [W]	FF [%]	Pseudo FF [%]	Účinnos t [%]	Celková plocha článku [mm ²]	J_{SC} [mAcm ²]
0,6254	0,1916	0,4656	0,1696	0,0789	65,90	79,1	16,62	475,2	40,31



Obr. 4.23: Elektroluminiscence vzorku B3.

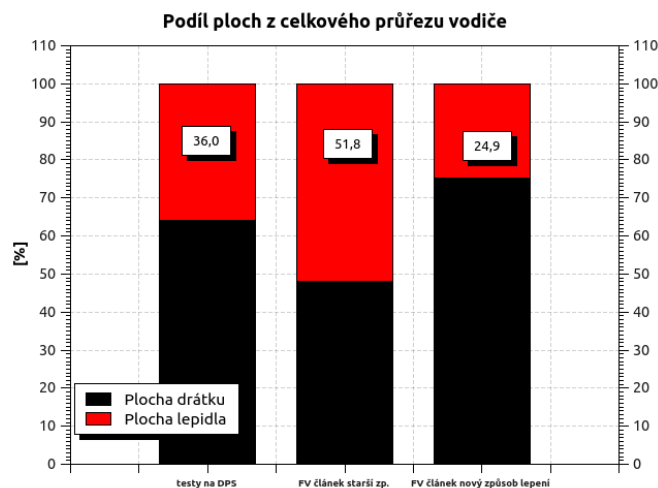


Obr. 4.24: VA charakteristiky vzorku B3 při osvětlení.

FV článek, který dosahuje nejvyšší dosažené hodnoty J_{SC} ze všech připravených vzorků. Nicméně i zde se opět projevuje vliv sériového odporu, pramenící z nehomogenity lepených spojů, který snižuje FF a účinnost.

Porovnání plochy vodivého lepidla a drátku

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, cena stříbra má zvyšující se tendence. Podíl stříbra na celkových nákladech na W_p začal být poslední dobou výrazný. Výrobci FV článků z toho důvodu směřují k technologiím, které minimalizují použití stříbra. Na následující Obr. 4.25 lze pohlížet, tak že představenou technikou lepení Cu drátku je možno vytvořit vodič, který používá jen třetinu až čtvrtinu svého průřezu ze stříbra.



Obr. 4.25: *Porovnání podílu vodivého lepidla a Cu vodiče z celkového průřezu vodiče při 3 různých technikách lepení drátku.*

Obr. 4.25 podává informace o průměrných hodnotách poměru plochy vodivého lepidla z celkového průřezu vodiče ze třech různých etap resp. technik řešení. První testy byly uskutečněné na testovacích obrazcích na DPS, následovaly experimenty označené „FV článek starší zp.“ - skupina vzorků A a vzorek B3 a poslední experimenty označené „FV článek nový způsob lepení“ zahrnují ostatní vzorky skupiny B. Postupným vývojem a optimalizací bylo dosaženo snížení podílu plochy stříbrného lepidla z celkové plochy průřezu vodiče na 24,9 %.

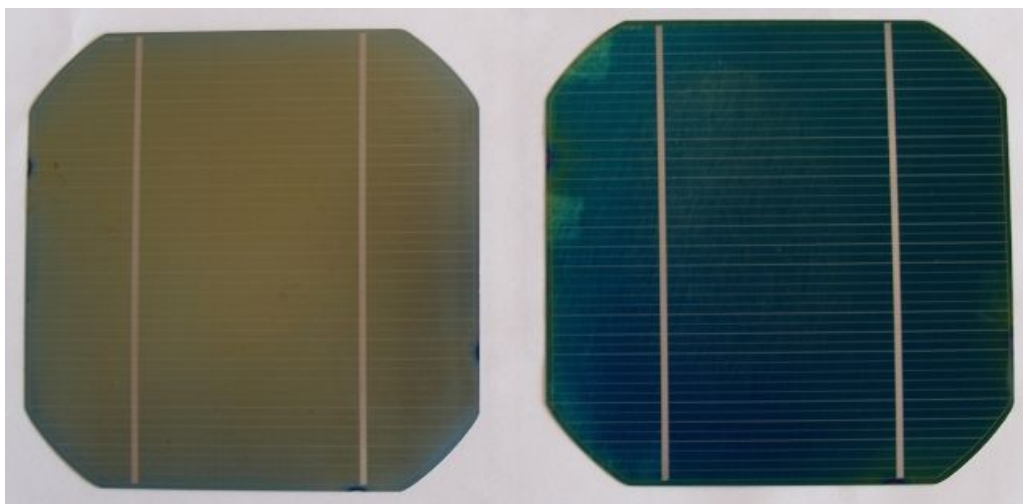
4.2.3 Barevné solární články s laserem definovanou přední metalizací

V případě antireflexních vrstev na bázi nitridu křemíku je nejvhodnější tloušťka vrstvy kolem 70 nm. Výsledný optický vjem barvy článku se 70nm antireflexní vrstvou je tmavě modrý. Vzhledem k efektivnímu využití FV článků v tzv. aktivních fasádách je z architektonického hlediska vhodné disponovat větší paletou barev bez výrazné ztráty účinnosti FV článků. Toho je možné dosáhnout pomocí depozice několika dielektrických vrstev, které pak mohou mít výslednou tloušťku >200 nm. Problematika barevných článků s vysokou účinností pro architektonické aplikace se řeší ve firmě Solartec s.r.o. v samostatném projektu. Průběžné výsledky projektu (k datu 31.8.2012) jsou použity pro srovnání ve výsledkové části této kapitoly.

Standardní technologie kontaktování emitoru pomocí tlustovrstvé metalizace se zde dostává za technologické možnosti „průpalu“ přes celou tloušťku dielektrických vrstev. Alternativní možnosti odstranění dielektrických vrstev jsou následující: mechanické rýhování, laserového rýhování (ablace), tlustovrstvé leptací pasty.

Výsledky

Testovací FV články byly připraveny pomocí laserového odstranění antireflexních a pasivačních vrstev. Po depozici zárodečného Ni kontaktu byly z části 5 palcových FV článků (Obr. 4.26) vytvořeny řezy o velikosti 15x30 mm. Řezy byly následně zesíleny pomocí drátkové technologie (viz kapitola 4.2).

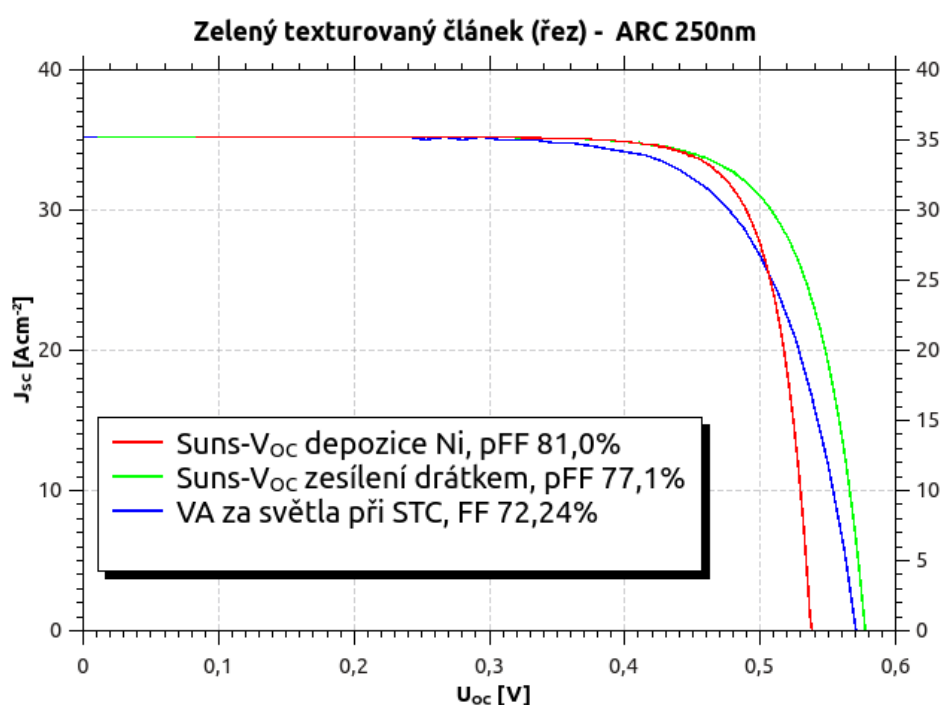


Obr. 4.26: FV články se zárodečnou vrstvou Ni. Vlevo „zlatá barva“ bez texturovaného povrchu, vpravo „zelená“ s texturovaným povrchem.

Výsledky z měření při osvětlení (STC) jsou zobrazeny v tabulce 4.5. Vzhledem k diametrálně rozdílné ploše referenčních článků je nutné porovnávat výsledky proudové hustoty J_{sc} a účinnosti. Stejně jako v kapitole 4.2 se ukazuje, že drátková metalizace dosahuje relativně vysokých hodnot proudové hustoty a to i při použití neoptimalizovaného způsobu lepení. Nízké hodnoty účinnosti u referenčních monokrystalických článků jsou způsobeny nedostatečným průpalem standardní tlustovrstvé metalizace. Články s chemickým niklem a přilepenými Cu drátky dosahují vyšší účinnosti ve srovnání s multikrystalickými referenčními články a to i přes to, že hodnota FF je nižší. Z Obr. 4.27 vyplývá, že snížení FF způsobuje zvýšený sériový odpor.

Tabulka 4.5 Porovnání výsledků zelených FV článků s referenčními články (se sítotiskovou metalizací) s výsledky článků se zárodečným Ni kontaktem.

Typ krystalu Si – typ metalizace	I_{sc} [A]	U_{oc} [A]	P_M [W]	FF [%]	Plocha [cm ²]	J_{sc} [mAcm ⁻²]	Tloušťka ARC [nm]	Účinnost [%]
Monokrystal - sítotisk*	4,219	0,468	1,037	52,55	148,5	28,4	250	7,0
Multikrystal - sítotisk*	4,456	0,614	2,021	73,9	148,5	30,00	250	13,6
Monokrystal – Ni + Cu drátek	0,1621	0,5729	0,0671	72,24	459,87	35,26	250	14,59



Obr. 4.27 sdružuje 3 VA charakteristiky dokončených vzorků. Červená křivka je pseudo VA křivka po chemické depozici niklu, zelená je pseudo VA křivka po přilepení drátků a žíhání. Modrá křivka představuje VA charakteristiku článku při STC.

* Výsledky referenčních FV článků je možno použít s laskavým svolením A. Poruby, P. Čecha a P. Wostrýho ze společnosti Solartec s.r.o.

5 Závěr a zhodnocení

Technologické postupy selektivní chemické nebo galvanické depozice niklu a mědi je možno považovat ve fotovoltaickém průmyslu jen za částečně poznané a používané. K většímu rozšíření a intenzifikaci vědeckovýzkumných aktivit v oblasti alternativní metalizace k přispěla v poslední době především zvýšená burzovní cena stříbra. Pro vhodné elektrovodivé vlastnosti a nízkou cenu jsou aktivity ve fotovoltaickém průmyslu směřovány k náhradě stříbra, zejména mědi.

V technologickém portfoliu firmy Solartec s.r.o. doposud nebyla selektivní depozice niklu výrazněji zastoupena. Bylo nutno vytvořit popřípadě ověřit technologické postupy depozice niklu pro nové technologie FV článků. Zejména pro využití laserových procesů, jakožto velmi flexibilního nástroje při přípravě metalizace přední strany článků.

V praktické části práce byly z tohoto důvodu zkoumány vlastnosti chemicky vyloučených povlaků niklu. V práci byla, pro přípravu vzorků jednotlivých experimentů, použita laserová ablace pasivačních a antireflexních vrstev SiN_x (resp. Si_3N_4). Na základě analýzy a optimalizace kontaktů na povrchu n-typových emitorů se potvrdila nutnost žíhání chemických povlaků pro snížení kontaktního odporu. Mezi posuzované vlastnosti selektivních niklových kontaktů patří měrný kontaktní odpor, který dosahuje u zkoumaných vzorků vhodně žíhaných, hodnot kolem $8 \text{ m}\Omega\text{cm}^{-2}$ a vrstvý odpor $450 \text{ m}\Omega/\text{sq}$. Tyto kovové vrstvy je nutné díky velkému vrstvýmu odporu považovat jen jako za „zárodečné“ pro další způsob zesílení.

V rámci analýzy vlastností kontaktů v objemu křemíku byly zkoumány možnosti a vlastnosti prokovení děr. Prokovené díry mají využití při výrobě tzv. MetallizationWrapThrough článků. Jedná se o fotovoltaické články s vyvedeným předním kontaktem na zadní stranu, právě díky prokoveným děrám. Byly navrženy a vyhodnoceny vzorky polovodičových struktur s jednou i několika prokovenými děrami. Nikl byl deponován pomocí metod chemické depozice z lázně. U prokovených děr bylo dosaženo odporu $1,3 \Omega/\text{prokov}$ a u paralelní kombinace děr $0,5 \Omega/\text{prokov}$. Tyto výsledky jsou ovšem jen mezikrokem pro výrobu solárních článků typu MWT, neboť je nutné přistoupit ještě k následnému zesílení niklového kontaktu. Standardními metodami pro snížení vrstvého odporu zárodečných kontaktů jsou galvanické procesy nebo další chemické procesy, které již díky svému rozsahu nebyly v této práci řešeny.

Pro krystalické křemíkové solární články s přední metalizací na povrchu byl navržen a realizován nový alternativní způsob zesílení niklových kontaktů, který sestává z nalepení tenkého měděného vodiče na Ni kontakt s pomocí vodivého, stříbrem plněného lepidla. Mezi přednosti této metody patří snížení zastínění přední-aktivní plochy FV článků a tím dosažení větší proudové hustoty J_{sc} díky možnosti vynechání busbarů. Vynechání busbarů umožní snížit zastínění přední plochy FV článku o 3,2%. Další výhodou tohoto přístupu je ve faktu 3-4x nižšího odporu drátku (na jednotku délky) při srovnání běžného sítotiskově vytvářeného prstu. Ekonomický přínos této metody spočívá v nahrazení části stříbra cenově dostupnější mědí. Po dokončení první série laboratorních vzorků se ukazuje, že určitá úskalí tohoto přístupu jsou v homogenitě lepeného spoje.

Byly vyzkoušeny dvě techniky lepení drátků. Jedna přináší prsty s nízkou šířkou, ale s menší homogenitou lepeného spoje. Druhá má již lepený spoj homogenní, ale prozatím je šířka prstů větší a dochází k většímu stínění. V rámci rozsahu dosavadních prací se zatím nepodařilo výhody obou metod spojit.

Výsledky nejlepších dokončených laboratorních vzorků FV článků (plocha $\sim 5 \text{ cm}^2$)

vykazují cca o 0,5-0,6 % absolutní účinnosti méně než standardní články se sítotiskovou metalizací (plocha $\sim 148 \text{ cm}^2$).

Při vyhodnocení testů z oblasti tzv. „barevných“ FV článků však dosahují články s drátkovým zesílením laserově definované metalizace vyšší absolutní účinnosti o 1 % při srovnání s FV články se sítotiskově zhotovenou metalizací.

Výsledky zesílení metalizace pomocí drátků dosud nebyly publikovány a v současné době jsou připravovány podklady pro právní ochranu předkládané technologie a podklady pro účast na mezinárodní konferenci EU PVSEC (28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition).

Aktivity pro další směřování výzkumu a praktické realizace v oblasti zesílení kontaktů pomocí drátků:

- automatizace procesu lepení drátků a využití laseru pro vytvrzení vodivého lepidla, popř. vytvrzení lepidla v průběhu laminačního procesu,
- aplikace drátkového zesílení na větší plochy FV článků při zachování nebo zlepšení homogenity lepeného spoje,
- vzájemné řetězení článků s drátkovou metalizací, laminace řetězce do standardní struktury FV panelu, dlouhodobé venkovní testy popř. ověření vlastností FV panelu stanovených v ČSN EN 61215, ověření spolehlivosti lepeného spoje při teplotním cyklování,
- další snížení množství vodivého lepidla ve spoji.

Seznam použité literatury

- [1] GOETZBERGER, ADOLF, KNOBLOCH, JOACHIM, VOSS, BERNHARD . *Crystalline Silicon Solar Cells: Technology and Systems Applications*. Chippenham: John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 254 s. ISBN 0471971448.
- [2] FRODL, M. *Metody a technologie vytváření kovových kontaktů pro struktury křemíkových solárních článků*. Brno, 2009. 60 s. Diplomová práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Hladík.
- [3] Chemické niklové povlaky [online]. Citováno 3.dubna 2012. Dostupné z: <<http://www.brogal.cz/Home/chemicke-niklovani>>.
- [4] JANDOVÁ, K. *Diagnosticke metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008. 91 s. Dizertační práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí dizertační práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [5] Progress in Photovoltaics: . Č. vol.3, no.3. Chippenham: John Wiley & Sons, Ltd., 1995. Vychází Ročně. ISSN 1099-159X.
- [6] [online]. Citováno 4.března 2012. Dostupné z: <<http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance>>.
- [7] ČECH, P. *Optimalizace sintrace přední metalizace: technická zpráva výzkumného projektu*. Rožnov pod Radhoštěm: Solartec s.r.o., 2011.
- [8] LUQUE, ANTONIO, HEGEDUS, STEVEN. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Chippenham: John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 1115 s. ISBN 0-471-49196-9.
- [9] GRISCHKE, R. EFINGER, L. RUBIN. Day4 technology allows enhanced fine line front metallization for low cost mass production. In *Proceedings of the 25th photovoltaic solar energy conference and exhibition*. Valencia, Španělsko: WIP Munchen, 2010. s. . ISBN 3-936338-26-4.
- [10] ČECH, P., HLADÍK, J. *Analýza tlustovrstvé metalizace: technická zpráva výzkumného projektu*. Rožnov pod Radhoštěm: Solartec s.r.o., 2012.
- [11] Celková brutto výroba elektřiny v rámci elektrizační soustavy [online]. Citováno 20. září 2012. Dostupné z: <<http://www.ceps.cz/CZE/Data/Vsechna-data/Stranky/Vyroba.aspx>>.
- [12] TOUS, L., DORP, D.H., HERNANDEZ, J-L. Minimizing junction damage associated with nickel silicide formation for the front side metalization of silicon solar cell. In *Proceedings of the 26th European Photovoltaic solar energy conference and exhibition*. Hamburk, Německo: WIP Munchen, 2011. s. 1210 - 1215. ISBN 3-936338-27-2.
- [13] FALCON, T. Aspect ratio improvements for printed frontside conductor on silicon solar cells. In *Proceedings of the 24th European Photovoltaic solar energy conference and exhibition*. Hamburg, Německo: WIP Munchen, 2009. s. 1338-1336. ISBN 3-936338-25-6.
- [14] VAZQUES, C., CABALLERO, L. J. *Towards the limits of efficiency of screen printed solar cells, new techniques for the front side contacts*, Citováno 2010, Dostupné z: <>.
- [15] HLADÍK, J. *Selektivní metody pro vytváření masek v dielektrické vrstvě SiNx: technická zpráva výzkumného projektu*. Rožnov pod Radhoštěm: Solartec s.r.o., 2009.
- [16] HLADÍK, J. *Úpravy testovacího obrazce "Reimer": technická zpráva výzkumného projektu*. Rožnov pod Radhoštěm: Solartec s.r.o., 2010.
- [17] WOSTRÝ, P., FRANTÍK, O.. *Měření koncentračních profilů u FV článků: technická zpráva výzkumného projektu*. Rožnov pod Radhoštěm: Solartec s.r.o., 2011.

Author's Curriculum Vitae

Name: Jiří Hladík

Born: 30th of January 1980, Czech Republic

Address: Havlíčkova 1170, Valašské Meziříčí, 757 01, Czech Republic

Contacts: 00420 737 441 570, jiri.hladik@solartec.cz

Education

- 1998-2001 Brno University of technology, Faculty of Electrical Engineering and informatics, Bachelor's degree programme, Definition of working condition for ionization ESEM's detectors.
- 2002-2006 Brno University of technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Master's degree programme, Methods and technologies for thick film metal contacts of crystalline silicon solar cells.
- 2006-2009 Brno University of technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Doctoral programme, Analysis and optimisation of selective technological processes for contacts on crystalline silicon solar cells.

Research experience

Cooperation with company Solartec s.r.o. Since 2005 (full time employe since 2008) in the areas of: process automation, diagnostics methods for PV industry on the cell and module level and whole range of selective processes – etching, deposition and diagnostics of metal contacts, laser processes.

Other activities in Solartec s.r.o. - PV hybrid systems with focus on own consumption of PV generated energy.

Languages

- Active knowledge of English and German,
- Passive knowledge of Spanish.

Hobbies

climbing and cycling and most of the outdoors activities.

Abstrakt

Dizertační práce pojednává o metodách přípravy a analýzy kontaktů krystalických křemíkových článků se zaměřením na využití selektivních procesů při jejich přípravě.

Maskovací schopnosti nitridu křemíku jsou využity pro selektivní leptání křemíku, selektivní difúzi fosforu a selektivní depozici kontaktů na bázi chemického niklu.

Elektrické vlastnosti zárodečných kovových kontaktů jsou analyzovány pomocí metod založených na čtyřbodovém měření. Morfologie zárodečných a zesílených kontaktů pomocí optické a elektronové mikroskopie.

Dosažených výsledků je využito při výrobě křemíkového solárního článku s inovačním typem přední metalizace se strukturou: chemický nikl, vodivé lepidlo, měděný drátek. Tento přístup umožňuje snížit zastínění přední plochy FV článku převážně díky vynechání sběrných elektrod-tzv. busbarů. Další výhodou tohoto přístupu je nahrazení stříbra levnější mědí alespoň ve 2/3 průřezu vodiče přední elektrody fotovoltaiického článku. Pro selektivní odstranění vrstvy nitridu křemíku je použito infračerveného laserového svazku.

Abstract

The submitted work deals with the methods for manufacturing and analysis of contacts on crystalline silicon solar cells. It is focused on selective processes for the production of solar cells metal contacts.

The masking feature of silicon nitride is used for selective silicon etching, selective phosphorus diffusion and selective electro-less nickel deposition.

Properties of metal contacts precursors are investigated using optical microscopy and their electrical properties using methods based on a four-point probe method.

Results are used for the manufacturing of silicon, solar cell with an innovative type of the structure of the front side metallization: chemical nickel, conductive adhesive and copper wire. This approach allows to reduce shading of the front area of PV cells with the ability to avoid usage of busbars. The another advantage of this approach is in replacement of costly silver in at least 2/3 cross section of the front side metallization. Selective ablation of silicon nitride layer was conducted by means of IR laser beam.

[4] [11] [5] [15] [17] [3] [1] [14] [6] [7] [13] [12]